

基于特征点位置校正的靶标位姿测量方法

闵永智^{1,2} 陶佳¹ 任维卓¹

摘要 针对图像式路基沉降监测系统中由于振动等因素导致靶标与相机发生偏转产生测量误差的问题, 本文在设计监测系统靶面位姿测量系统的基础上提出了基于 4 特征点位置校正的位姿测量方法. 首先介绍了图像式路基沉降监测方法的工作原理; 然后根据实际情况设计了区别于传统特征点的 4 特征点靶面的位姿测量系统, 并利用特殊特征点对靶面特征点进行位置校正; 最后根据设计的 4 特征点靶面测量系统提出已知矩形 4 特征点边长的位姿求解方法. 实验结果表明: 本文方法比迭代法位姿解算后角度误差值更小, 其位姿解算相对误差减小 1.2%. 当偏转角度小于 2° 时, 本文方法位姿求解旋转角度误差小于 0.09°, 相对角度误差为 1.003%. 其时间和测量精度都能够达到监测系统要求, 可以应用于监测系统中需要对相机和靶标进行实时标定的场景.

关键词 路基沉降, 监测系统, 位置校正, 位姿解算, 测量精度

引用格式 闵永智, 陶佳, 任维卓. 基于特征点位置校正的靶标位姿测量方法. 自动化学报, 2020, 46(3): 509–517

DOI 10.16383/j.aas.c190217



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

The Measurement Method of Target Pose Based on Feature Points Position Calibration

MIN Yong-Zhi^{1,2} TAO Jia¹ REN Wei-Zhuo¹

Abstract Aiming at the problem of measurement error caused by the deflection of the target and the camera in the image subgrade settlement monitoring system due to vibration, a pose measurement method based on 4 feature points position calibration was proposed. Firstly, the operational principle of the image based settlement monitoring method was introduced and the components and working model of the online surface settlement monitoring system were described. Then, different from the traditional feature points a pose measurement system with the 4 feature points target surface is designed, and using special feature point to calibrate the target surface. Finally, the method of target pose based on rectangular side length known was proposed. Experimental results show that the angle error of this method is smaller than that of the iterative method, the relative error of the pose solution is reduced by 1.2%. When the deflection angle is less than 2°, the method solves the rotation angle error of less than 0.09°, the relative angular error is 1.003%. The time and accuracy of the proposed method can meet the requirements of the monitoring system, it can also be applied to scenes in the monitoring system that require real-time calibration of the camera and target.

Key words Subgrade settlement, monitoring system, position calibration, posture solution, measurement accuracy

Citation Min Yong-Zhi, Tao Jia, Ren Wei-Zhuo. The measurement method of target pose based on feature points position calibration. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(3): 509–517

路基作为轨道交通工程中的关键部位^[1]是轨道结构、列车载荷的基础承载体系, 若存在结构变形,

不仅会造成轨道发生形变, 进而还会造成列车振动严重, 甚至出现安全事故问题^[2]. 因此, 为了保证列车安全运营, 需要采取有效措施精确控制铁路无砟轨道线下工程的工后沉降变形问题^[3–5]. 传统的监测方法有观测桩法、沉降板法、沉降水杯法和传感器监测法等, 这些方法虽然安装方便, 但需要人工逐点测量, 不能自动监测且成本较高^[6–8]. 因此针对铁路路基沉降变形的长期、自动和高精度监测的问题, 于起峰等^[9–11]提出了基于激光的摄像机接力测量形变的方法. 这是一种新型的、非接触式的即刻式沉降测量方法. 利用点激光的准直特性及图像检测技术获取清晰且高质量的激光光斑图像, 并通过精确定位光斑图像的中心来反映相对于基准点的路基沉

收稿日期 2019-03-21 录用日期 2019-08-22

Manuscript received March 21, 2019; accepted August 22, 2019
国家自然科学基金(61663022), 甘肃省自然科学基金(18JR3RA105), 兰州交通大学“百名青年优秀人才培养计划”基金资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (61663022), Natural Science Foundation of Gansu Province (18JR3RA105), and Foundation of one Hundred Youth Talents Training Program of Lanzhou Jiaotong University

本文责任编辑 阳春华

Recommended by Associate Editor YANG Chun-Hua

1. 兰州交通大学自动化与电气工程学院 兰州 730070 2. 甘肃省人工智能与图形图像处理工程研究中心 兰州 730070

1. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070 2. Gansu Provincial Engineering Research Center for Artificial Intelligence and Graphics and Image Processing, Lanzhou 730070

降变形^[12-13]. 为了提高此方法的测量精度, 文献 [14-16] 分别从光斑图像质量和光斑中心定位精度作出了研究. 然而当监测系统长期运营后, 由于振动等因素导致相机和靶标发生相对偏转产生测量误差, 因此现场需要对靶标和相机进行实时标定. 靶标和相机之间的相对位姿关系有 6 个自由度, 绕 X , Y , Z 3 个轴的旋转和沿 3 个轴的平移, 在路基沉降的检测中垂直方向上的位移变化即为沉降值, 所以沿 X , Y 轴平移不会影响垂直位移, 由于相机和靶标安装在统一固定的检测平台上, 因此相机与靶标的运动是同步的, 不会发生相对的垂直位移变化, 因此靶标和相机只有 3 自由度的相对运动且偏转角度微小. 文献 [17] 提出了基于传递像机的不稳定测量平台向静态基准转换的方法, 该方法使摄像测量在不稳定平台上也能高精度进行动态测量, 但由于体积太大不能安装在路基沉降监测系统中. 文献 [18] 采用倾角传感器提供多个角度约束, 设计了一种单目视觉与倾角传感器组合的测量系统, 虽然提高了系统测量精度和稳定性, 但监测成本高, 不适用于路基沉降大范围的监测.

因此, 本文讨论将靶标与相机相对位姿信息的求解转化为基于特征点解算的 PnP 问题, 该方法通过控制特征点间位置关系的约束来求解观察靶标与摄像机间的相对位置和相对姿态. 首先针对监测系统的实际情况设计与监测环境相适应的 4 特征点靶面位姿测量系统, 然后针对采集特征点缺失或模糊的情况对特征点进行校正, 最后利用已知矩形靶面 4 特征点的边长进行位姿解算. 为了验证改进后的 4 特征点靶面位姿测量系统的正确性与实用性, 搭建位姿测量系统进行实验. 由于目前非线性迭代求解算法因计算结果精确而广泛应用于像机位姿实时估计^[19], 因此为了验证矩形靶面 4 特征点位姿解

算方法的有效性, 使之与迭代求解算法进行对比分析, 验证该方法的可行性与精度.

1 路基表面沉降监测系统概述

基于激光路基表面沉降变形相机链视觉传递测量系统原理图如图 1 所示, 发射端固定在一个基准点, 接收端固定在下一个监测点, 两个监测站之间相互间隔为 25~50 m, 在实际监测系统中可以根据监测路段的路基状况与距离来适当地确定安装传递检测站之间的距离以及传递监测站点的数量. 靶面光斑图像采集设备安装在靶面正后方, 其采集的光斑图像大小恰好能够覆盖整个靶面. 发射端的激光照射在接收端靶面形成一个近似圆形光斑, 当路基发生沉降时, 接收端的光斑图像也会发生同样位移变化. 通过采集变化前后的光斑图像, 然后由光斑中心定位算法计算出中心位置 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , 最后对两幅图像的光斑中心位置做差分, 得到监测点相对于基准点的沉降变形量 ($\Delta x = x_2 - x_1$, $\Delta y = y_2 - y_1$), 并将本监测点沉降变形数值传递到下一级传递监测站, 这样利用监测站和传递站通过首尾光学相连的方式形成了一个“链条”, 从而实现了沉降变形的传递视觉监测.

路基表面沉降变形是一个长期、缓慢的过程, 需要长期连续观测. 因此依据监测现场条件与需求设置每隔 2 min 采集一次数据, 对路基情况进行实时分析. 由于铁路沿线监测环境较为恶劣, 且铁路限界又限制了监测点不能安装体积较大、合作标识点较多的监测系统, 因此监测系统在监测点的体积、结构都有严格的限制. 每个监测点的摄像机对准前方监测点激光光源所对准的接收靶面, 定时检测该监测点的沉降量, 通过对所有监测点的沉降量

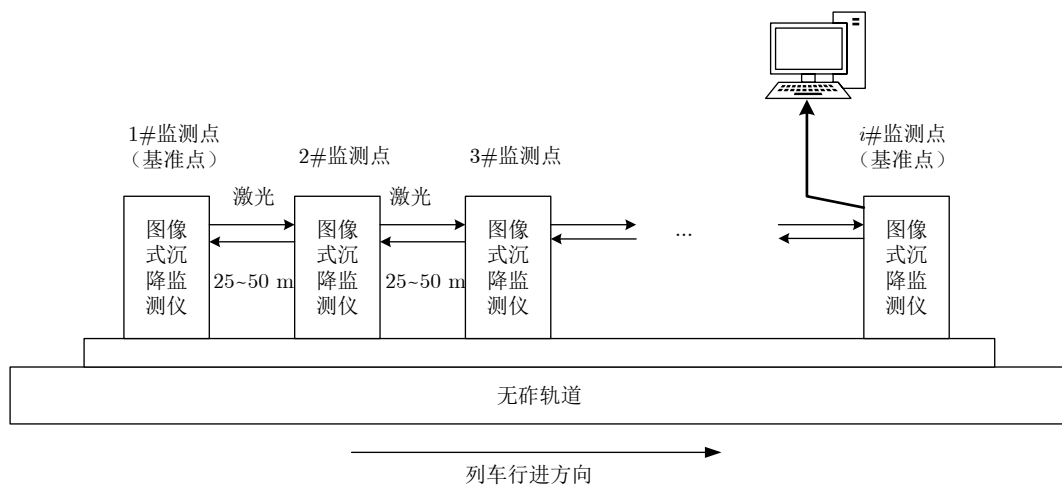


图 1 路基表面沉降监测系统

Fig. 1 Subgrade surface settlement monitoring system

数据融合分析,完成对检测区间的沉降值传递,最终通过某一沉降监测点将所有数据传递至监控中心,完成沉降观测的测量。

实际上,图像式路基沉降监测系统在传递沉降变形信息的同时也将各传递检测站的测量误差累积传递了下去,最终的测量精度必然会随着传递检测站个数的增加而降低,因此要及时消除传递检测站之间的测量误差,借鉴铁路路基表面沉降观测标准中的闭合平差方法,将链式测量方法构造成一个闭合回路,通过闭合平差的方法来消除累积误差。

传递站间构成的闭合回路如图 2 所示.往返双相机链中每两个相邻的测量基站为 T_1 和 T_2 , L , C , M 分别为监测系统光源、相机和靶面.光源 L_1 所在坐标系经过 $L_1 \rightarrow M_2 \rightarrow C_2 \rightarrow L_2 \rightarrow M_1 \rightarrow L_1$ 依次传递形成一个闭合回路,记两个坐标系之间的旋转矩阵为 R ,因为空间中任意坐标系到其自身的坐标变换关系都为单位矩阵 I ,所以存在以下约束关系:

$$R_{L_1.M_2} R_{M_2.C_2} R_{C_2.L_2} R_{L_2.M_1} R_{M_1.L_1} = I \quad (1)$$

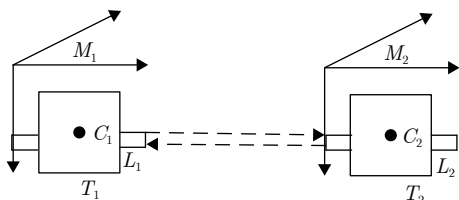


图 2 相邻传递检测站构成的闭合回路

Fig. 2 Closed loop composed of detection stations

环路闭合误差产生在 T_1 和 T_2 两个检测站的测量值不能满足上述约束关系时,利用工程测量平差的方法对相邻两个检测站的测量值进行修正,最终通过对监测系统中每对相邻传递检测站分别构造上述闭合平差方法完成路基沉降变形传递测量的数据优化.因此路基表面沉降监测系统主要利用闭合平差的方法来消除系统传递累积误差,提高测量精度。

2 靶面位姿测量系统

激光和相机链相结合的路基表面沉降变形传递测量系统中最主要的就是进行光斑中心的精确定位,而接收靶面与相机的正确位姿估计是精确定位的前提,因此传递检测站中相机与接收靶面的位姿估计是利用相机对沉降变形进行视觉测量的首要问题.经实际运营测试发现在监测期间该系统长期处于无人值守,且维修天窗时间短不能进行人工干预,对列车经过振动后检测站内各单元相对位置变化不能实时估计,进而无法得知监测路段是否发生真实沉降,因此监测系统的自动化检测设备就显得尤为重要.为此,首先根据传递检测站的体积、环境、结

构等限制要求,设计了如图 3 所示的传递检测站的靶面位姿测量系统结构图.系统主要由摄像机、光源、4 特征点靶面、倾角仪测量装置、精密位移平台、嵌入式系统(图像处理设备及数据传输设备)组成.其相当于将光源发送单元与相机拍摄靶面图像的接收单元整合,由于监测系统是双向链式测量系统,所以在监测点系统结构设置中为了保证双向监测与链式传递测量,监测点需要设置双向摄像机、两个接收靶面与光源.由于相机和接收靶面安装位置固定,所以应该在安装前进行相机和靶面的位姿求解。

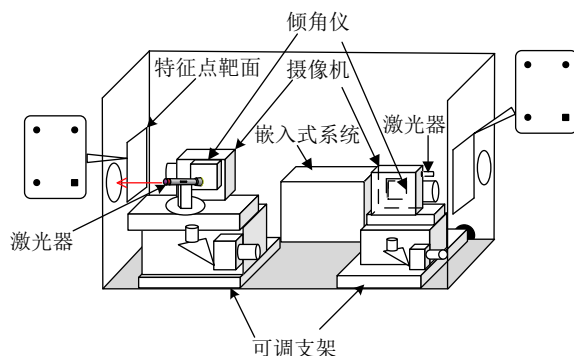


图 3 位姿测量系统结构图

Fig. 3 Pose measurement system structure

2.1 特征点设计

利用特征点间位置关系的约束来求解接收靶面与摄像机间的相对位置和相对姿态是大型物体形变测量的主要解决方法,因此要在接收靶面设置合理的标志点.特征点的研究主要集中于 3~5 特征点,其中 3 特征点的位姿求解算法成熟,但由于其解法复杂度高,又存在多解及算法的鲁棒性差等问题,使其应用受到一定的限制^[20-21],且三点不能实现对偏转靶面的校正;4 特征点共面时位姿求解可以得到唯一解,但通常所采用的迭代求解算法稳定性较低;5 特征点的位姿求解可以得到稳定性高的唯一解,但激光光斑投射到靶面的光斑图像与靶面中间特征点会重合,进而影响光斑图像的质心定位.因此考虑到监测系统中发生振动导致相机与特征点靶面相对位置偏转、长期运营标志点模糊、特征点采集缺失等实际情况.因此充分利用传递检测站靶面的特性以及靶面大小已知的特点,设计监测系统靶面特征点为区别于传统 4 特征点(如图 4 所示)的 p_0, p_1, p_2 3 个圆形特征点和 p_3 1 个特殊特征点.不仅可以得到稳定的唯一解,而且能够利用特殊特征点实现靶面正方向的校正。

2.2 特征点位置校正

目标特征点的提取与定位是位姿测量的关键技

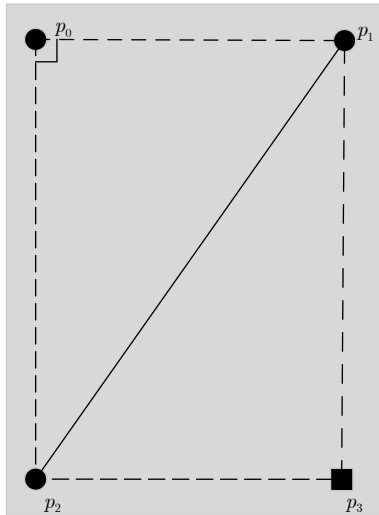


图 4 矩形特征点校正示意图

Fig. 4 Feature point calibration

术, 因此要提高特征点提取与定位的精度. 由于在特征点图像采集过程中光照变化等会引起图像模糊、遮挡和缺失等现象, 造成图像噪声严重, 必须先对原始图像进行图像增强、去噪和图像分割等预处理, 然后进行靶面特征点的提取以及质心定位.

在实际监测系统中由于振动等因素的影响靶面和相机会发生偏转, 导致采集到的图像会发生标志点缺失, 无法提取到靶面特征点全部位置. 而且长时间在监测点安装的靶面表面会有灰尘吸附造成采集到的特征点靶面图像背景复杂, 无法从图像中提取到全部位置的特征点图像. 因此需要通过已知部分特征点位置探测靶面特征点位置坐标, 充分利用 4 特征点的结构特征以及特殊特征点完成对靶面校正.

特征点的校正分为特征点完整型位置校正和特征点缺失型位置校正, 当靶面或者相机偏转角度较小或背景清晰度较高时, 可以采集到特征点的数量为 $K = 4$, 可以通过矩形特征点的 l 和 d 进行判断特征点质心定位的精确度与图像采集的完整性. 如图 4 所示, 实验得到特征点 p_0, p_1, p_2, p_3 的像素坐标值后, 利用 4 特征点中任意一点, 例如 p_0 点进行验证, 图 5 为完整型位置校正流程图. 首先根据 $p_0p_1 = d, p_0p_2 = l$ 与 $p_0p_1 \perp p_0p_2$ 进行 p_0 与 p_2 的定位, 再计算 p_3 像素坐标值, 最后对计算得到的特征点坐标值与计算机处理得到的特征点定位值进行比较, 多次实验校正特征点位置使其误差 $|\Delta| \leq \pm 0.1 \text{ mm}$.

当相机与靶面偏转角度较大时, 采集特征点数量 $K \leq 3$, 即特征点靶面图像模糊复杂或特征点残缺, 可以利用已知矩形特征点边长以及结构特征进行残缺和模糊特征点的定位校正. 例如如图 4 所示的特征点靶面检测到 p_0, p_1, p_2 3 个标志点, 但 p_3 点

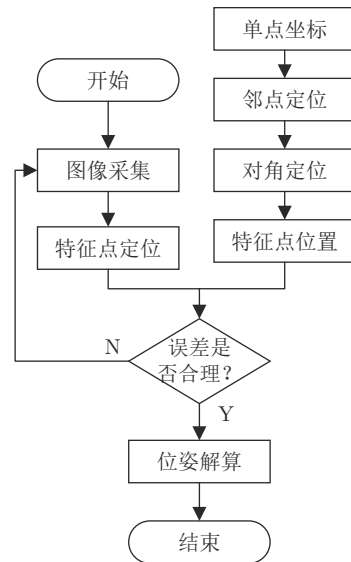


图 5 特征点位置校正流程图

Fig. 5 Feature point position calibration

多次实验定位误差 $|\Delta| > \pm 0.1 \text{ mm}$, 则判定 p_2 点为残缺点. 此时需要利用特征点缺失型进行位置校正. 首先在同一位置多次实验计算出清晰特征点 p_0 位置坐标分别为 p_0, p'_0, p''_0, p'''_0 , 多次实验将 p_0 点位置误差 $|\Delta| \leq \pm 0.1 \text{ mm}$ 的特征点位置坐标平均后作为 p_0 点的中心点坐标; 然后根据长宽已知矩形特征点的特性计算得到 p_1, p_2, p_3 特征点坐标; 最后根据正方向校正特征点即可完成对特征点的校正与定位处理.

3 4 特征点位姿解算方法

监测点安装的位姿测量系统已经根据实际安装地点的情况确定了相应的安装箱的尺寸, 以及安装靶面的尺寸, 因此根据靶面尺寸设计的 4 个矩形特征点是已知矩形特征点的边长. 文中以靶面 4 个特征点 p_0, p_1, p_2, p_3 的空间坐标以及投影点 q_0, q_1, q_2, q_3 的图像坐标作为输入, 通过求解矩形特征点分布的 PnP 问题来进行三维位姿解算. 由摄像机成像模型可知, 对于靶面上空间特征点坐标 (X_W, Y_W, Z_W) , 摄像机坐标系下坐标 (X_C, Y_C, Z_C) , 则两坐标系之间存在下述关系:

$$\begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \end{bmatrix} + T \quad (2)$$

其中, $R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}$ 为旋转矩阵, 表示相对姿态; $T = (T_X \ T_Y \ T_Z)^T$ 为平移向量, 表示相对位置参数. 三维位姿解算示意图如图 6 所示.

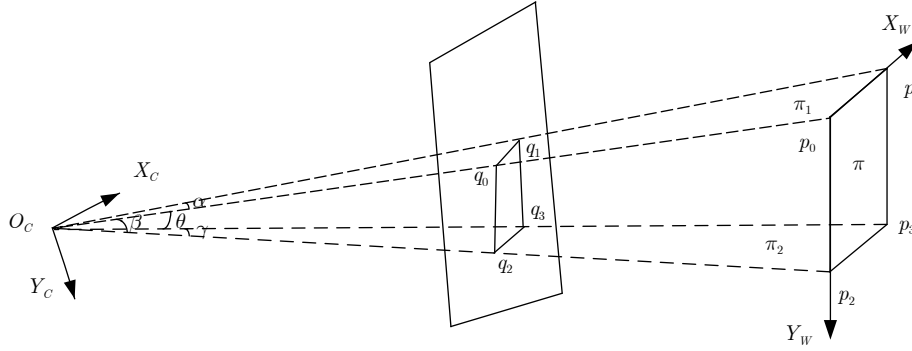


图6 矩形特征点位姿解算示意图

Fig. 6 Schematic diagram of rectangular feature point pose

1) 已知靶面特征点 p_0, p_1, p_2, p_3 对应像平面的点为 q_0, q_1, q_2, q_3 , 其中 $p_0p_1 \perp p_0p_2$, $p_0p_1 \parallel p_2p_3$, $|p_0p_1| = |p_2p_3| = d$, $|p_0p_2| = |p_1p_3| = l$;

2) 在像平面坐标系下 q_0, q_1, q_2, q_3 的像素坐标已知, 在靶标坐标系下 p_0, p_1, p_2, p_3 的空间坐标也已知, 摄像机内参数已知;

3) 设靶面特征点摄像机坐标系下坐标为 $q_0(x_0, y_0, f)$, $q_1(x_1, y_1, f)$, $q_2(x_2, y_2, f)$, $q_3(x_3, y_3, f)$, 其中 f 为摄像机焦距. 特征点靶面平面为 π , 光心 O_C 与 q_0q_1 形成平面为 π_1 , O_C 与 q_2q_3 形成平面为 π_2 . 设光心 O_C 到靶面特征点 p_0, p_1 的距离与 O_C 到像平面 q_0, q_1 距离的比值为 k_0, k_1 , 光心 O_C 到靶面特征点 p_2, p_3 的距离与 O_C 到像平面 q_2, q_3 距离的比值为 k_2, k_3 .

由 q_0q_1 的直线方程和摄像机内参数可以计算出平面 π_1 的标准法向量 \mathbf{N}_1 , 记 $\mathbf{N}_1 = (n_x, n_y, n_z)^T$ 且 p_0p_1 平行于 π_1 , 得 $\mathbf{N}_1^T \cdot \overrightarrow{p_0p_1} = 0$.

由 $\overrightarrow{p_0p_1} = \overrightarrow{op_1} - \overrightarrow{op_0} = k_1\overrightarrow{oq_1} - k_0\overrightarrow{oq_0}$, 得:

$$\begin{aligned} (k_1x_1 - k_0x_0) \times n_x + (k_1y_1 - k_0y_0) \times n_y + \\ (k_1f - k_0f) \times n_z = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

记 $h = \frac{k_1}{k_0} = \frac{n_x x_0 + n_y y_0 + n_z f}{n_x x_1 + n_y y_1 + n_z f}$, 由 $|p_0p_1| = d$, 得

$$\sqrt{(k_1x_1 - k_0x_0)^2 + (k_1y_1 - k_0y_0)^2 + (k_1f - k_0f)^2} = d \quad (4)$$

由式 (2) 和式 (3) 可得 k_0, k_1 , 计算出摄像机坐标系下 p_0, p_1 的坐标为

$$\begin{aligned} p_0(x_{p0}, y_{p0}, z_{p0}) &= (k_0x_0, k_0y_0, k_0f) \\ p_1(x_{p1}, y_{p1}, z_{p1}) &= (k_1x_1, k_1y_1, k_1f) \end{aligned}$$

同理可得

$$\begin{aligned} p_2(x_{p2}, y_{p2}, z_{p2}) &= (k_2x_2, k_2y_2, k_2f) \\ p_3(x_{p3}, y_{p3}, z_{p3}) &= (k_3x_3, k_3y_3, k_3f) \end{aligned}$$

设 p_0 为特征点靶面的原点, 因此 p_0 在摄像机坐标系下的空间坐标即为平移向量, 得到靶面与摄像机的相对位置参数为 $T = (x_{p0}, y_{p0}, z_{p0})^T$. 靶面坐标系的 X_W 轴在摄像机坐标系下的方向为 $\overrightarrow{p_0p_1} = \overrightarrow{op_1} - \overrightarrow{op_0} = (x_{p1} - x_{p0}, y_{p1} - y_{p0}, z_{p1} - z_{p0})$, 将向量 $\overrightarrow{p_0p_1}$ 标准化, 记为 (r_{11}, r_{21}, r_{31}) , 得:

$$\begin{aligned} (r_{11} \ r_{21} \ r_{31}) &= \left(\frac{x_{p1} - x_{p0}}{\sqrt{(x_{p1} - x_{p0})^2 + (y_{p1} - y_{p0})^2 + (z_{p1} - z_{p0})^2}}, \right. \\ &\quad \left. \frac{y_{p1} - y_{p0}}{\sqrt{(x_{p1} - x_{p0})^2 + (y_{p1} - y_{p0})^2 + (z_{p1} - z_{p0})^2}}, \right. \\ &\quad \left. \frac{z_{p1} - z_{p0}}{\sqrt{(x_{p1} - x_{p0})^2 + (y_{p1} - y_{p0})^2 + (z_{p1} - z_{p0})^2}} \right) \\ (r_{12} \ r_{22} \ r_{32}) &= \left(\frac{x_{p2} - x_{p0}}{\sqrt{(x_{p2} - x_{p0})^2 + (y_{p2} - y_{p0})^2 + (z_{p2} - z_{p0})^2}}, \right. \\ &\quad \left. \frac{y_{p2} - y_{p0}}{\sqrt{(x_{p2} - x_{p0})^2 + (y_{p2} - y_{p0})^2 + (z_{p2} - z_{p0})^2}}, \right. \\ &\quad \left. \frac{z_{p2} - z_{p0}}{\sqrt{(x_{p2} - x_{p0})^2 + (y_{p2} - y_{p0})^2 + (z_{p2} - z_{p0})^2}} \right) \end{aligned}$$

$$(r_{13} \ r_{23} \ r_{33}) = (r_{11} \ r_{21} \ r_{31}) \times (r_{12} \ r_{22} \ r_{32})$$

至此求解出姿态参数 R .

4 实验与结果

搭建路基沉降监测系统中位姿测量的实验平台, 采集靶标图像并提取标志点, 计算出标志点的坐标位置以及标志点的位姿解算. 实验中相机选用工业相机 CMOS 相机, 像元数为 $2\ 048$ 像素 \times $1\ 536$ 像素, 像元尺寸 $3.2\ \mu\text{m} \times 3.2\ \mu\text{m}$. 首先进行相机内参数的标定, 标定板选用特征圆高精度标定板, 标定板尺寸为 $400\ \text{mm} \times 300\ \text{mm}$; 特征圆呈阵列分布, 间距 $30\ \text{mm}$; 用特征圆的圆心坐标进行标定; 大圆 $20\ \text{mm}$, 小圆 $10\ \text{mm}$.

4.1 相机内参数的标定

利用 LabVIEW 软件工具箱对实验所用的 CMOS

相机进行标定. 求得相机内参数如表 1 所示, 其中 f_x , f_y 是焦距, 相机畸变系数为 k_1 , k_2 .

表 1 摄像机内参数标定结果
Table 1 Inner parameter calibration of the camera calibration

f_x (像素)	f_y (像素)	u_0 (像素)	v_0 (像素)	k_1	k_2
1 343.48	1 340.68	510.63	408.36	0.299602	-0.11056

4.2 仿真实验

为说明靶面光斑绕坐标轴旋转运动会影响光斑中心定位的检测精度, 在 MATLABR2014a 开发环境下进行仿真实验进行验证. 首先模拟带有圆光斑的靶标图像, 其靶标大小为 $13 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$, 然后按照初始靶标设计的特征点 p_2 点为坐标原点, 分别绕参考坐标 X_C , Y_C , Z_C 轴旋转, 仿真实验结果图如图 7 所示.

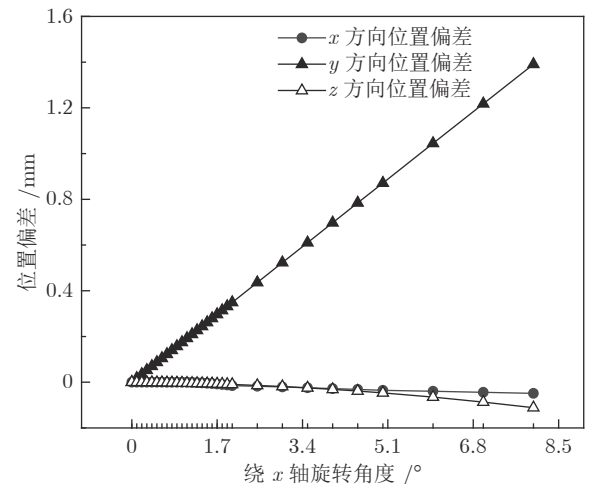
旋转角度为 0° 的数据表示初始靶面位置的偏差值, 图 7 主要表明了旋转过程中圆光斑中心位置与初始靶标位置的偏差变化, 从图中可以看出绕坐标轴旋转时, 其位置显示存在偏差, 因此相机与靶标之间的偏转会影响检测精度. 随着旋转角度的增大, 其坐标位置的偏差情况越严重, 因此对监测系统的靶标与相机之间的偏转要进行精确位姿估计.

4.3 实物实验

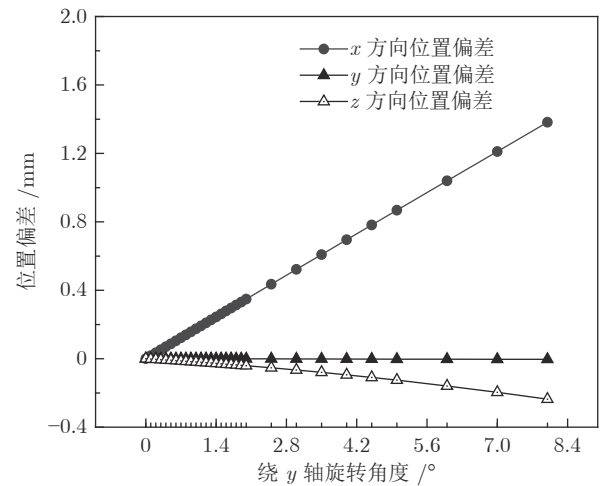
利用相机拍摄所设计的位姿测量系统的特征点靶面, 为了验证提出的基于特征点校正的位姿解算方法的有效性, 相机与精度为 0.01° 倾角仪平台固定在三维精密位移平台上, 分别绕坐标轴 X_C , Y_C , Z_C 旋转相机倾角仪, 对应的旋转角度分别为 θ , ϕ , φ , 旋转角度变化范围为 $0^\circ \sim 10^\circ$. 每组拍摄 1 000 张图片, 实验图如图 8 所示.

实验采集的原始特征点图像以及对图像特征点提取与质心定位结果图如图 9 所示, 并对特征点缺失或模糊的图像进行校正, 最后进行位姿解算得出旋转矩阵 R , 并将旋转矩阵 R 转化为描述角度变换的欧拉角 (θ, ϕ, φ) , $\theta = \arctan(r_{32}/r_{33})$, $\phi = \arctan(-r_{31}/\sqrt{r_{32}^2 + r_{33}^2})$, $\varphi = \arctan(r_{21}/r_{11})$, 为了验证本文方法的有效性, 利用非线性迭代求解方法^[19] 同时对拍摄特征点图像进行位姿解算. 实验结果图如图 10 所示.

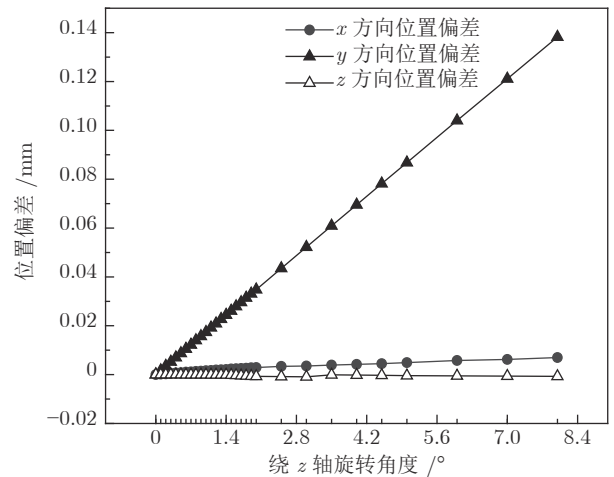
从图 10 可以看出, 由位姿解算后测量角度偏差与实际绕坐标轴旋转的角度相差不大, 相比于迭代法, 本文方法的位姿解算后角度误差值更小, 测量精度较高. 经本文位姿求解算法后旋转角度误差小于 0.34° , 非线性迭代算法求解后旋转角度误差小于 0.68° , 其位姿解算相对误差减小了 1.2%. 由于监测系统中靶标和相机安装固定, 所以发生偏转的



(a) 绕 x 轴旋转角度与位置偏差图
(a) Rotation angle and position deviation around x



(b) 绕 y 轴旋转角度与位置偏差图
(b) Rotation angle and position deviation around y



(c) 绕 z 轴旋转角度与位置偏差图
(c) Rotation angle and position deviation around z

图 7 旋转角度与位置偏差图

Fig. 7 Rotation angle and position deviation

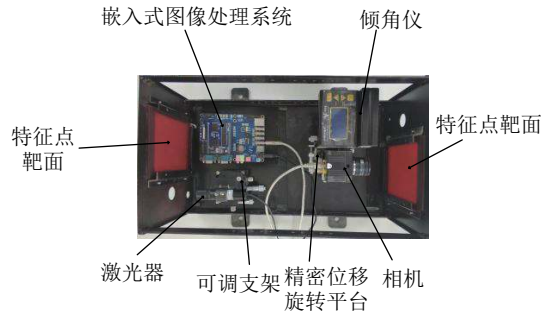


图 8 位姿测量系统实验图

Fig. 8 Pose measurement system experiment

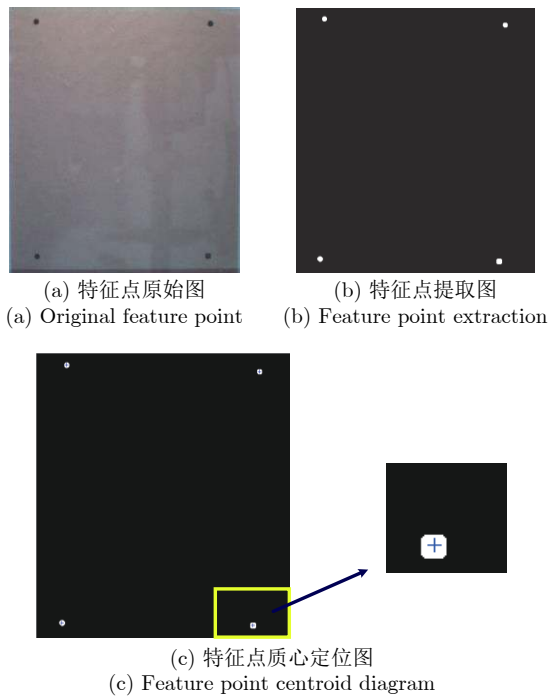
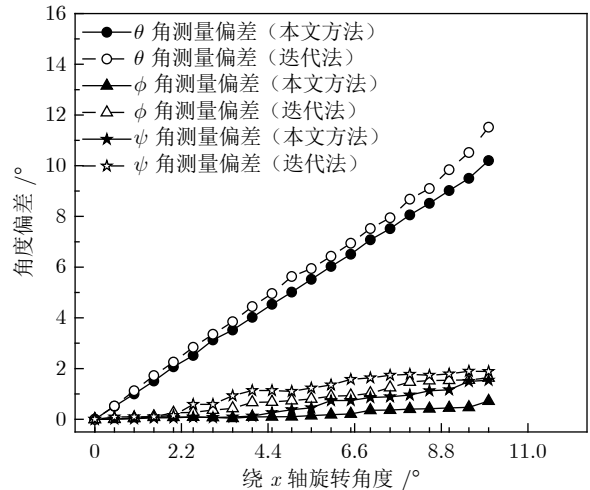


图 9 特征点提取与质心定位图

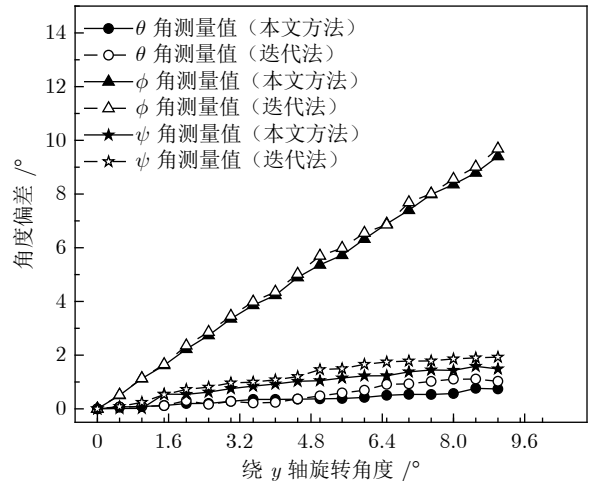
Fig. 9 Feature point extraction and centroid localization

角度很小, 当偏转角度小于 2° 时, 位姿求解旋转角度误差小于 0.09° , 相对角度误差为 1.003% . 验证了本文构建的位姿测量系统能够正确估计相机与靶标之间的相对位姿. 从图 10 中也可以看出, 测量角度偏差值随着旋转角度的增大而增大, 这是由于旋转角度的过大使得图像畸变严重, 像素点检测精度下降, 而旋转角度较小时, 图像变化较小, 畸变程度小, 测量角度偏差较小. 由于相机和靶面发生振动偏转的角度很小, 因此本文方法适用于此监测系统. 但实验中迭代法程序运行时间为 0.068 s , 本文方法耗时 0.12 s , 本文方法耗时较迭代法较长. 由于路基沉降过程缓慢, 监测系统设置为每隔 2 min 采集一次数据, 因此从程序运行时间上本文方法也同样适



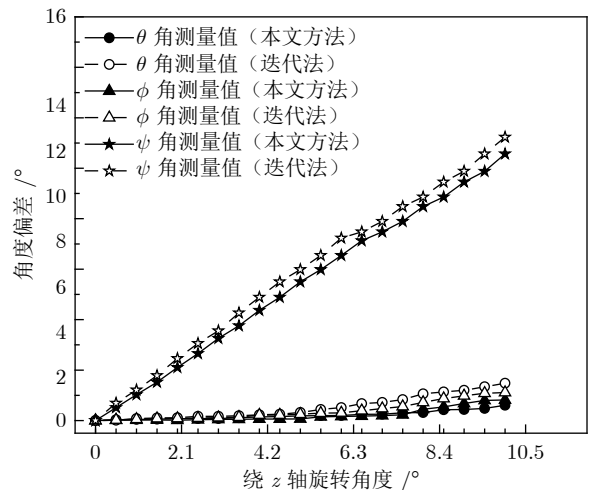
(a) 绕 x 旋转角度与解算角度关系图

(a) Rotation angle around x and solution angle



(b) 绕 y 旋转角度与解算角度关系图

(b) Rotation angle around y and solution angle



(c) 绕 z 旋转角度与解算角度关系图

(c) Rotation angle around z and solution angle

图 10 转角度与解算角度关系图

Fig. 10 Rotation angle and solution angle

用于此监测系统。

5 结论

本文针对路基表面沉降监测系统在长期运营中由于振动等因素影响靶标和相机位姿变化测量时会产生误差的问题,提出了基于靶标特征点位置校正的位姿测量方法来修正测量误差。根据实际运营情况设计了区别于传统特征点的4特征点靶面的位姿测量系统,并结合特定的4特征点靶面提出了一种已知矩形特征点边长的位姿求解方法,能够精确求解靶面与相机之间的相对位姿。结果表明:该方法的解算精度高于非线性迭代算法,经本文位姿解算法后旋转角度误差小于 0.34° ,非线性迭代算法求解后旋转角度误差小于 0.68° ,其位姿解算相对误差减小了1.2%。当偏转角度小于 2° 时,位姿求解旋转角度误差小于 0.09° ,相对角度误差为1.003%。因此,在图像式路基沉降监测系统中设计区别于传统特征点的矩形4特征点靶面不仅可以实现相机与靶面的实时位姿估计,而且可以利用特殊特征点实现对靶面特征点的位置校正。基于靶面矩形4特征点提出的位姿求解方法时间和精度都达到了监测系统要求,在实际运营中不仅减少了人工干预次数与人工巡检工作量,而且经该方法标定后的监测系统可长期运营,提高了工作效率以及检测精度。因此该方法可以应用于监测系统中需要对相机和靶标进行实时标定的场景。

References

- Liu Xue-Zhu, Chen Guo-Xing. Advances in researches on mechanical behavior of subgrade soils under repeated-load of high-speed track vehicles. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2008, **28**(2): 248-255
(刘雪珠, 陈国兴. 轨道交通荷载下路基土的动力学行为研究进展. 防灾减灾工程学报, 2008, **28**(2): 248-255)
- Mao Bo. Discussion on the settlement problem of railway subgrade and its control measures. *Science and Technology Information*, 2008, **28**(13): 99-100
(毛波. 谈铁路路基沉降问题及其控制措施. 工程建设与设计, 2008, **28**(13): 99-100)
- Liao Shi-Fang, Ye Man-Zhu. Design scheme for subgrade settlement automatic monitoring system on Lanzhou-Wulumuqi high-speed railway. *High Speed Railway Technology*, 2013, **4**(5): 26-30
(廖世芳, 叶满珠. 兰新高速铁路路基沉降自动化监测系统整体设计方案. 高速铁路技术, 2013, **4**(5): 26-30)
- Zhang Yu-Zhi, Du Yan-Liang, Sun Bao-Chen, Liang Jian-Chang. High-speed railway ballastless track roadbed settlement monitoring method based on fluid pressure differential. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2013, **37**(1): 80-84
(张玉芝, 杜彦良, 孙宝臣, 梁建昌. 基于液力测量的高速铁路无砟
- 轨道路基沉降变形监测方法. 北京交通大学学报, 2013, **37**(1): 80-84)
- Tan Q L, Xie C. Comparison and analysis of permafrost railway subgrade settlement deformation monitoring. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, **226-228**: 1651-1654
- Hua Mei. Analysis on common settlement deformation monitoring methods for high-speed railway subgrade. *Railway Standard Design*, 2014, **58**(s1): 122-125
(花梅. 高速铁路路基常用沉降变形监测方法浅析. 铁道标准设计, 2014, **58**(s1): 122-125)
- Zhao Hong-Yong, Liu Jian-Kun, Cui Jiang-Yu. Cognition and evaluation of monitoring method for subgrade settlement of high speed railway. *Subgrade Engineering*, 2001, (6): 15-17
(赵洪勇, 刘建坤, 崔江余. 高速铁路路基沉降监测方法的认识与评价. 路基工程, 2001, (6): 15-17)
- Wei Feng-Hai. Several causes of high-speed railway subgrade settlement and its monitoring method. *Road Machinery and Construction Mechanization*, 2010, **27**(10): 24-27
(危凤海. 高速铁路路基沉降的几种原因及其监测方法. 筑路机械与施工机械化, 2010, **27**(10): 24-27)
- Yu Qi-Feng, Jiang Guang-Wen, Ding Xiao-Hua, Shang Yang. Research on measurement method and system of optical line camera measurement for measuring large ship hull deformation. In: *Proceedings of the China Society of Theoretical and Applied Mechanics*, Beijing, China, 2007.
(于起峰, 姜广文, 丁晓华, 尚洋. 测量大型船体变形的折线光路摄像测量方法与系统研究. 庆祝中国力学学会成立50周年暨中国力学学会学术大会, 中国北京, 2007.)
- Jiang Guang-Wen. Research on Camera Measurement Method and Ship Deformation Measurement [Ph.D.dissertation], National University of Defense Technology, China, 2010.
(姜广文. 像机链位姿传递摄像测量方法及船体变形测量研究 [博士学位论文], 国防科学技术大学, 中国, 2010.)
- Shang Yang, Yu Qi-Feng, Guan Bang-Lei, Sun Cong, Zhong Li-Jun, Liu Hai-Bo, Zhang Xiao-Hu. Research progress in large-scale structural deformation monitoring camera measurement. *Experimental Mechanics*, 2017, **32**(5): 593-600
(尚洋, 于起峰, 关棒磊, 孙聪, 钟立军, 刘海波, 张小虎. 大型结构变形监测摄像测量研究进展. 实验力学, 2017, **32**(5): 593-600)
- Min Yong-Zhi, Dang Jian-Wu, Zhang Zhen-Hai. On-line monitoring system for surface settlement of image ballastless track. *Optical Precision Engineering*, 2013, **21**(6): 1621-1627
(闵永智, 党建武, 张振海. 图像式无砟轨道表面沉降在线监测系统. 光学精密工程, 2013, **21**(6): 1621-1627)
- Min Yong-Zhi, Guo Wei, Dang Jian-Wu. Center positioning of target surface image for subgrade settlement monitoring system of high-speed rail. *Optical Precision Engineering*, 2017, **25**(10s): 288-296
(闵永智, 郭薇, 党建武. 高铁路基沉降监测系统靶面图像中心定位. 光学精密工程, 2017, **25**(10s): 288-296)
- Qin Yun-Bai, Xu Wen-Ju, Zhu Jun. An improved algorithm based on laser spot detection. *Laboratory Technology and Management*, 2018, **26**(5): 66-73
(秦运柏, 徐汶菊, 朱君. 基于激光光斑中心检测的改进算法. 实验

技术与管理, 2018, **261**(5): 66-73)

- 15 Cao Yuan-Jia, Wei Guang-Jun, Li Xian-Long. Improvement of image processing and edge detection of laser spot. *Laser and Infrared*, 2016, **46**(9): 1160-1164
(曹远佳, 尉广军, 李先龙. 激光光斑的图像处理及边缘检测的改进. 激光与红外, 2016, **46**(9): 1160-1164)
- 16 Zhang Shao-Tang, Wu Hong, Ning De-Qiong. A high precision laser image spot detection method. *Journal of Lasers*, 2018, **39**(8): 153-156
(张绍堂, 吴鸿, 宁德琼. 一种高精度的激光图像光斑中心检测方法. 激光杂志, 2018, **39**(8): 153-156)
- 17 Yu Qi-Feng, Sun Xiang-Yi, Jiang Guang-Wen, Liu Xiao-Lin, Zhang Xiao-Hu, Zhou Jian, Shang Yang. Relay camera videometrics based conversion method for unstable platform to static reference. *Science China Technological Sciences*, 2011, **41**(5): 681-686
(于起峰, 孙祥一, 姜广文, 刘肖琳, 张小虎, 周剑, 尚洋. 基于传递像机摄像测量的不稳定平台的静态基准转换方法. 中国科学: 技术科学, 2011, **41**(5): 681-686)
- 18 He Fei-Yan, Lin Jia-Rui, Gao Yang, Ren Yong-Jie, Zhu Ji-Gui. Pose measurement system optimized by combination of monocular vision and inclinometer. *Acta Optica Sinica*, 2016, **36**(12): 190-197
(何斐彦, 林嘉睿, 高扬, 任永杰, 郑继贵. 单目视觉与倾角仪组合优化的位姿测量系统. 光学学报, 2016, **36**(12): 190-197)
- 19 Liu Jin-Bo, Guo Peng-Yu, Li Xin, Zhang Xiao-Hu. Performance evaluation of camera attitude estimation algorithm based on point correspondence. *Acta Optica Sinica*, 2016, **36**(5): 121-130
(刘进博, 郭鹏宇, 李鑫, 张小虎. 基于点对应的相机姿态估计算法性能评价. 光学学报, 2016, **36**(5): 121-130)
- 20 Hao Ying-Ming, Zhu Feng, Ou Jin-Jun, Wu Qing-Xiao, Zhou Jing, Fu Shuang-Fei. Robust analysis of pose measurement system based on point feature. *Journal of Computer Applications*, 2008, **28**(7): 1713-1716
(郝颖明, 朱枫, 欧锦军, 吴清潇, 周静, 付双飞. 基于点特征的位姿测量系统鲁棒性分析. 计算机应用, 2008, **28**(7): 1713-1716)
- 21 Sun Feng-Mei, Wang Bo. A note on the roots distribution and stability of the PnP problem. *Acta Automatica Sinica*, 2010, **36**(9): 1213-1219
(孙凤梅, 王波. 关于 PnP 问题多解的分布与解的稳定性的讨论. 自动化学报, 2010, **36**(9): 1213-1219)



闵永智 兰州交通大学自动化与电气工程学院教授. 2014 年获兰州交通大学电子与信息工程学院博士学位. 主要研究方向为图像处理, 机器视觉与人工智能测试. 本文通信作者.

E-mail: minyongzhi@mail.lzjtu.cn

(MIN Yong-Zhi Professor at the College of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University. He received his Ph.D. degree from Lanzhou Jiaotong University in 2014. His research interest covers computer vision, computer image processing, and intelligent measurement system Corresponding author of this paper.)



陶佳 兰州交通大学自动化与电气工程学院硕士研究生. 2017 年获兰州理工大学电气工程与信息工程学院学士学位. 主要研究方向为机器视觉与计算机图像处理.

E-mail: 18394036553@163.com

(TAO Jia Master student at the College of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University. She received her bachelor degree from Lanzhou University of Technology in 2017. Her research interest covers computer vision and computer image processing.)



任维卓 兰州交通大学自动化与电气工程学院硕士研究生. 2017 年获武汉纺织大学机械工程与自动化学院学士学位. 主要研究方向为机器视觉与计算机图像处理.

E-mail: renwzyjs@163.com

(REN Wei-Zhuo Master student at the College of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University. He received his bachelor degree from Wuhan Textile University in 2017. His research interest covers computer vision and computer image processing.)